

BAB II

TIJAUAN PUSTAKA

2.1 Analisa Hidrologi

Berikut ini tidak akan dibahas mengenai analisa data mulai dari uji konsistensi data hujan, curah hujan harian maksimum, distribusi hujan, uji distribusi frekuensi, curah hujan efektif, distribusi hujan jam-jaman, dan perhitungan hidrograf banjir rancangan dikarenakan, pada studi ini akan memakai data inflow bendungan tugu yang telah dihitung dari data hujan dari tahun 1976-2009. Dan dari data tersebut akan didapatkan debit banjir rencana periode ulang 25 tahun yang menggunakan metode Hidrograf Satuan Sintetik Nakayasu.

2.2 Penelusuran Banjir Melalui Conduit

Penelusuran banjir adalah peramalan hidrograf di suatu titik pada suatu aliran atau bagian sungai yang didasarkan atas pengamatan hidrograf di titik lain. Hidrograf banjir dapat ditelusuri lewat palung sungai atau lewat waduk. Penelusuran banjir lewat waduk didasarkan pada persamaan kontinuitas sebagai berikut:

$$I - O = \frac{ds}{dt} \dots\dots\dots (2-1)$$

Dimana :

I = Aliran yang masuk ke waduk (m^3/dt)

O = Aliran yang keluar dari waduk (m^3/dt)

$\frac{ds}{dt}$ = Perubahan tampungan tiap periode (m^3/dt)

(Sumber : CD. Soemarto, 1986:189).

Jika fasilitas pengeluarannya berupa terowongan, maka harus diperhitungkan terhadap dua macam keadaan :

1. Kondisi aliran bebas (*free flow*)

Kondisi aliran ini terjadi bila aliran dalam terowongan tidak penuh atau ujung udik tidak tenggelam, sehingga masih berupa aliran alur terbuka (*open channel flow*). Pada keadaan demikian, maka digunakan persamaan uniform oleh Manning sebagai berikut

$$Q = V \cdot A \dots\dots\dots (2-2)$$

Dimana :

V = Kecepatan aliran (m/det)

$$V = \left(\frac{1}{n}\right) \times R^{2/3} \times S^{1/2}$$

n = Koefisien kekasaran Manning

R = Jari-jari hidrolis (m)

$$= A/P$$

P = Keliling basah saluran

S = Kemiringan alur terowongan

A = Luas penampang basah (m²)

D = Tinggi saluran /terowongan/culvert (m)

(Sumber : CD. Soemarto,1986:191).

Tabel 2.1 Nilai koefisien kekasaran manning

Tipe saluran dan jenis bahan	Max	Min
Permukaan semen halus	0,013	0,010
Beton Precast	0,015	0,011
Besi	0,017	0,012

2. Aliran tekan (*pressure flow*)

Aliran ini akan terjadi bila terowongan terisi penuh atau ujung udik terowongan tenggelam, sehingga terjadi aliran tekan (*preassure flow*). Dalam hal demikian kecepatan airnya ditentukan oleh perbedaan tinggi tekanan (head) dipermulaan dan diujung terowongan. Pada keadaan demikian dapat digunakan persamaan sebagai berikut :

$$H = f_e \frac{v^2}{2g} + f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + f_c \frac{v^2}{2g} + f_b \frac{v^2}{2g} + f_o \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots (2-3)$$

$$(1) \quad (2) \quad (3) \quad (4) \quad (5)$$

$$= (f_e + f \frac{L}{D} + f_c + f_b + f_o) \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots (2-4)$$

$$= \Sigma f \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots (2-5)$$

(1) = Kehilangan energi pada saat masuk inlet (m), v adalah kecepatan air dalam terowongan (m/detik). Fe adalah koefisien kehilangan energi yang besarnya tergantung kepada bentuk inlet.

(2) = Kehilangan energi akibat geseran (m), dimana :

f = koefisien geseran, yang dapat dihitung dengan rumus DARCY –

WEISBACH atau THYSSE.

L = panjang terowongan (m)

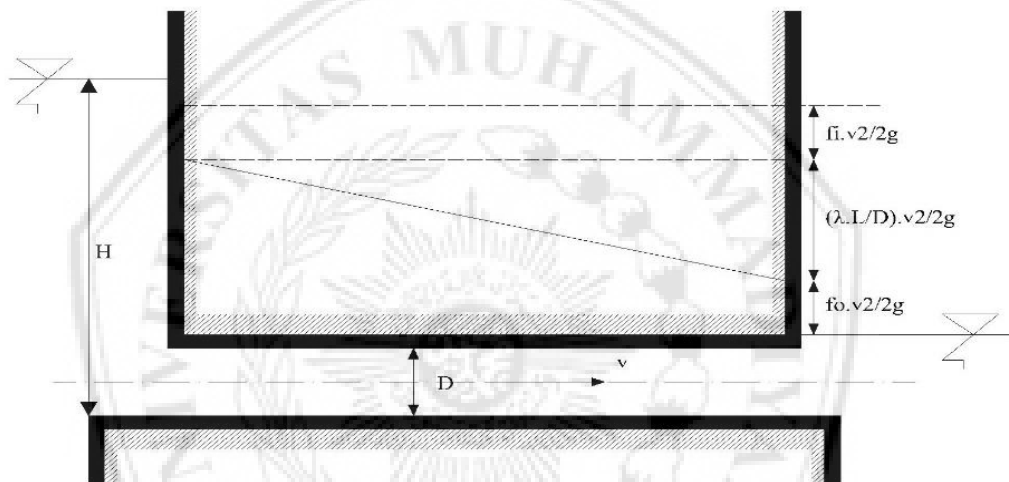
D = diameter terowongan (m)

(3) = Kehilangan energi akibat adanya perubahan penampang didalam terowongan (m),
f_c adalah koefisien kehilangan energi karena aadanya perubahan penampang.

(4) = Kehilangan energi akibat adanya belokan (m), f_b adalah koefisien kehilangan energi akibat adanya belokan, yang besarnya dipengaruhi oleh sudut-sudut belokan dan jari-jari belokan.

(5) = Kehilangan energi pada saat keluar dari outlet (m), f_o adalah koefisien kehilangan energi yang besarnya tergantung pada bentuk outlet.

(Sumber : CD. Soemarto,1986:192).



Gambar 2.1 Aliran Tekan

$$V = \sqrt{\frac{2 \times g \times h}{\Sigma f}}, \text{ dan } Q = A \times v \dots\dots\dots (2-6)$$

$$\text{Sehingga } Q = A \sqrt{\frac{2 \times g \times h}{\Sigma f}} \dots\dots\dots (2-7)$$

Di mana :

H = Kedalaman air waduk dihitung dari dasar inlet terowongan (m)

D = Tinggi terowongan (m)

S = Kemiringan terowongan

L = Panjang alur terowongan (m)

A = Luas penampang basah (m^2)

$\sum f$ = Jumlah koefisien kehilangan energi

$$= f_i + f_m + f_o + f_b$$

f_i = Koefisien kehilangan energi pada inlet

f_m = Koefisien kehilangan energi akibat gesekan pada dinding terowongan (*major losses*)

f_o = Koefisien kehilangan energi pada outlet

f_b = Koefisien kehilangan energi akibat adanya belokan, yang besarnya dipengaruhi oleh sudut belokan dan jari-jari belokan

(Sumber : CD. Soemarto, 1986:193)

2.3 Dimensi Bendungan Pengelak

Setelah dilakukan perhitungan penelusuran banjir didapatkan elevasi muka air banjir dimuka terowongan pengelak. Sehingga perhitungan dapat dilanjutkan dengan merencanakan dimensi bendungan pengelak (*cofferdam*).

2.3.1 Tinggi Bendungan Pengelak

Puncak bendung pengelak ditempatkan setinggi kebutuhan jagaan diatas muka air tertinggi dari hasil perhitungan analisa muka air tertinggi didepan saluran pengelak. Sehingga kebutuhan tinggi bendungan pengelak dirumuskan sebagai berikut :

$$H = HWL(Q_{25}) + H_f \dots \dots \dots (2-8)$$

Dimana :

H = Elevasi puncak bendungan pengelak

$HWL(Q_{25})$ = Muka air tertinggi didepan terowongan untuk Q_{25}

H_f = Tinggi jagaan

(Sumber : Suyono Sosrodarsono, 2002:259).

Dimana tinggi jagaan dihitung berdasarkan kebutuhan tinggi jagaan untuk muka air normal sebagai berikut :

$$H_f = h_w + \frac{h_e}{2} + h_a + h_i \dots\dots\dots (2-9)$$

Dimana :

H_f = Tinggi jagaan total

h_w = Tinggi ombak akibat tiupan angin

h_e = Tinggi ombak akibat gempa

h_a = Tinggi kemungkinan kenaikan permukaan air waduk

h_i = Tinggi tambahan

(Sumber : Suyono Sosrodarsono, 2002:171).

2.3.2 Lebar Puncak Bendungan Pengelak

Lebar bendungan pengelak yang memadai diperlukan untuk dapat menahan aliran filtrasi yang melalui bagian puncak bendungan pengelak. Untuk mendapatkan lebar yang minimum pada bendungan pengelak, biasanya dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$b = 3,6 H^{1/3} - 3,0 \dots\dots\dots (2-10)$$

Dimana :

b = Lebar puncak bendungan

H = Tinggi bendungan pengelakp

(Sumber : Suyono Sosrodarsono, 2002:174)

2.3.3 Tipe Bendungan Pengelak

Penentuan tipe bendungan pengelak didasarkan pada kondisi geologi, topografi, dan klimatologi di lokasi yang akan dibangun bendungan tersebut. Selain itu ketersediaan material di lokasi juga sangat berpengaruh dalam penentuan tipe bendungan, karena demi menghemat biaya konstruksi. Dalam studi ini bendungan pengelak (*cofferdam*) merupakan bendungan pengelak tipe urugan batu menggunakan inti miring.

2.3.4 Stabilitas Bendungan Pengelak

Analisa stabilitas pada tubuh bendungan sangat diperlukan pada perencanaan bendungan pengelak untuk mengetahui seberapa kuat tubuh bendungan dapat menahan air dalam jumlah yang sangat besar. Mengingat akan terjadinya rembesan pada tubuh bendungan pengelak, maka hal ini yang akan menjadi salah satu faktor penting dalam perhitungan stabilitas bendungan.

Untuk analisa stabilitas terhadap longsor, menggunakan bantuan software *GEOSTUDIO SLOPE/W* 2018. Model bidang gelincir yang berbentuk melingkar dapat dibuat pada software *SLOPE/W* dengan teknik grid & radius . Bidang gelincir melingkar dibuat berdasarkan lingkaran yang memotong lereng dari suatu titik pusat tertentu yang menyinggung garis radius dan teratur dalam bentuk grid maka lingkaran yang memotong lereng dapat dibuat sebanyak jumlah titik pusat yang ada. Nilai SF untuk masing-masing lingkaran yang dibuat berbeda-beda, dan dengan menggunakan *SLOPE/W* maka nilai SF yang paling sesuai dapat ditentukan dengan melihat pada karakteristik tanah pada lereng yang mencakup berat jenis (γ), kohesi (c), dan sudut geser(ϕ). Metode yang digunakan adalah metode irisan (*Fellenius Ordinary*).

$$FS = \frac{\sum\{c.l + (N - U - Ne) \tan\phi\}}{\sum(T + Te)} \dots\dots\dots (2-11)$$

$$F_s = \frac{\sum c.l + \sum \{\gamma . A (\cos \alpha - e . \sin \alpha) - V\} \tan \phi}{\sum \gamma . A (\sin \alpha + e . \cos \alpha)} \dots\dots\dots (2-12)$$

Dimana :

F_s = Faktor keamanan

N = Beban komponen vertical yang timbul dari berat setiap irisan bidang lurus
 (= $\gamma . A . \cos \alpha$)

T = Beban komponen tangensial yang timbul dari berat setiap irisan bidang lurus
 (= $\gamma . A . \sin \alpha$)

U = Tekanan air pori yang bekerja pada setiap irisan bidang lurus

N_e = Komponen vertical beban seismic yang bekerja pada setiap irisan bidang
 lurus (= $e . \gamma . A . \sin \alpha$)

T_e = Komponen tangensial beban seismic yang bekerja pada setiap irisan bidang
 lurus (= $e . \gamma . A . \cos \alpha$)

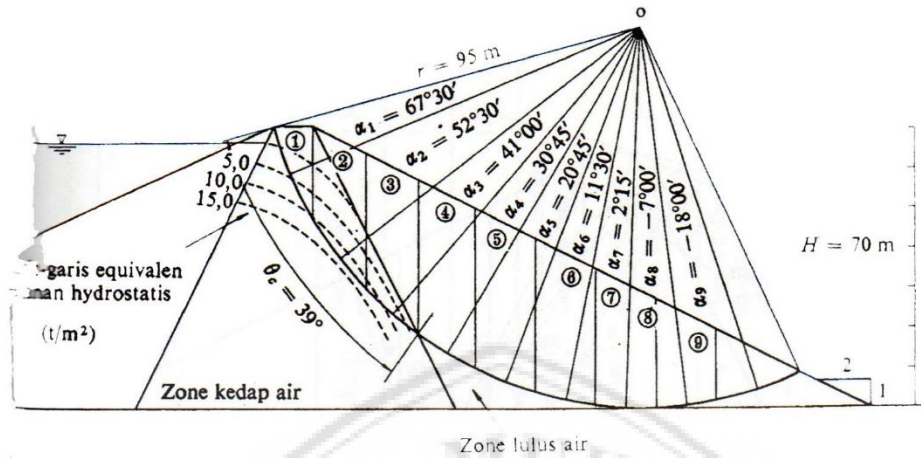
I = panjang busur (m)

∅ = Sudut gesekan dalam bahan yang membentuk dasar setiap irisan bidang
 lurus (°)

C = Angka kohesi bahan yang membentuk dasar setiap irisan bidang lurus

γ = Berat isi setiap bahan pembentuk irisan bidang lurus (t/m³)

(Sumber : Suyono Sosrodarsono, 2002:141)



Gambar 2.2 Skema Perhitungan dengan Metode Irisan Bidang Luncur

Pada saat kondisi gempa, rumus yang digunakan untuk perhitungan koefisien gempa sebagai berikut :

$$k = \frac{Ad}{g} \dots \dots \dots (2-13)$$

$$Ad = z \cdot Ac \cdot v \dots \dots \dots (2-14)$$

(Sumber : Kriteria Perencanaan 06, 2009:91).

Dimana :

k = koefisien gempa

Ad = percepatan gempa terkoreksi (gal)

Ac = percepatan gempa dasar (gal)

z = percepatan gempa dasar berdasarkan peta zona gempa wilayah Indonesia

v = faktor koreksi pengaruh jenis tanah setempat

g = percepatan gravitasi

Untuk analisa stabilitas terhadap rembesan, pada dasarnya tubuh bendungan harus mampu menahan gaya-gaya yang ditimbulkan dari adanya air rembesan yang mengalir melalui celah-celah butiran tanah pembentuk tubuh bendungan dan pondasinya.

Kapasitas aliran filtrasi dapat diperkirakan berdasarkan pada jaringan trayektori aliran filtrasi dengan rumus sebagai berikut :

$$Q_f = \frac{N_f}{N_p} \cdot k \cdot H \cdot L \dots\dots\dots (2-15)$$

Dimana :

- Q_f = kapasitas aliran filtrasi (m^3/det)
 N_f = angka pembagi dari garis trayektori aliran filtrasi
 N_p = angka pembagi dari garis equipotensial
 k = koefisien filtrasi (m/det)
 H = tinggi tekanan air total
 L = panjang profil melintang tubuh bendungan

(Sumber : Suyono Sosrodarsono, 2002:165).

Agar gaya-gaya *hydrodinamis* yang terjadi pada aliran filtrasi tidak mengakibatkan sufosi dan sembulan yang sangat membahayakan tubuh bendungan pengelak, maka kecepatan aliran filtrasi dalam tubuh bendungan pengelak tersebut perlu dibatasi, karena aliran filtrasi yang memiliki kecepatan tinggi dapat membahayakan baik tubuh maupun pondasi bendungan pengelak. Sehingga ditentukan faktor keamanan piping sebagai berikut :

$$Fk = \frac{i_{cr}}{i} \dots\dots\dots (2-16)$$

$$i_{cr} = \frac{(Gs-1)}{(1+e)} \dots\dots\dots (2-17)$$

Dimana :

F_k = Angka keamanan piping (minimal 4)

i_{cr} = gradien hidraulik dari material timbunan atau pondasi

i = gradien hidraulik debit

G_s = berat jenis material

e = angka porositas

(Sumber :Hary Christady, 2007:36)

2.4 Dimensi Conduit

Untuk penentuan dimensi *conduit* saluran pengelak di studi ini mengacu pada Laporan Bendungan Tugu Balai Besar Wilayah Sungai Brantas. Sehingga perhitungan beberapa dimensi *conduit* saluran pengelak dapat diketahui melalui penjabaran pada sub-bab berikut.

2.4.1 Penampang Dimensi Conduit

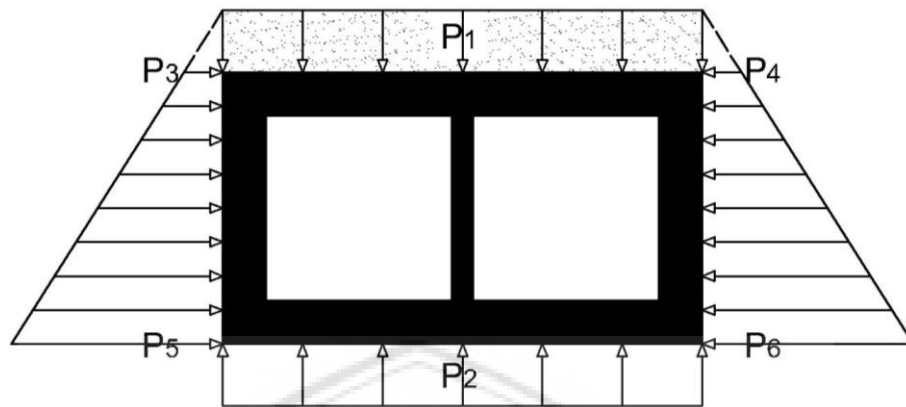
Pada studi ini, penampang *conduit* yang digunakan berbentuk persegi sebanyak dua (2) buah dengan perhitungan dimensi yang berbeda sebanyak 4 kali perhitungan yaitu 1x1m, 2x2m, 3x3m, dan 4x4m.

2.4.2 Konstruksi Dimensi Conduit

Konstruksi *conduit* pada studi ini menggunakan konstruksi berbentuk segi empat tertutup. Oleh karena konstruksi *conduit* yang dipasang berada diatas tanah asli maka selanjutnya akan ditimbun tanah kembali. Konstruksi ini terbuat dari beton bertulang dengan kekuatan beton K-225 dan mutu baja 500 Mpa.

2.4.3 Pembebanan

Berikut ini adalah kondisi pembebanan pada saluran di bawah permukaan tanah:



Gambar 2.3 Gaya yang Bekerja pada *Box Culvert*

Dimana :

P1 = Gaya akibat beban tanah diatas konduit (ton)

P2 = Gaya akibat gaya vertikal (ton)

P3, P4, P5, P6 = Gaya akibat tekanan tanah aktif disamping dinding (ton)

Perhitungan pada struktur suatu bangunan saluran pengelak didasarkan pada kombinasi berbagai gaya yang bekerja pada saluran pengelak.

1. Tekanan tanah aktif :

$$Pa = \frac{1}{2} \cdot Ka \cdot \gamma \cdot H_2^2 \dots\dots\dots (2-18)$$

Dimana :

Pa = Tekanan tanah aktif (ton)

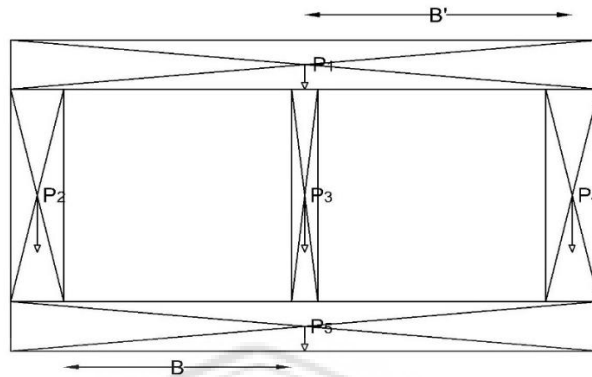
Ka = koefisien tanah aktif (ton)

γ_t = Massa jenis tanah (t/m^3)

h = Tinggi tanah (m)

(Sumber : Braja M.Das, Jilid 2:50).

2. Berat sendiri bangunan :



Gambar 2.4 Berat Sendiri Bangunan

$$W = \gamma \cdot V \dots\dots\dots (2-19)$$

Dimana :

- W = Berat Bangunan (ton)
- γ = Berat Jenis Bahan (t/m^3)
- V = Volume (m^3)

(Sumber : Braja M. Das, Jilid 1:31).

3. Gaya Akibat Pengaruh Gempa

$$W_e = W \cdot K_h \dots\dots\dots (2-20)$$

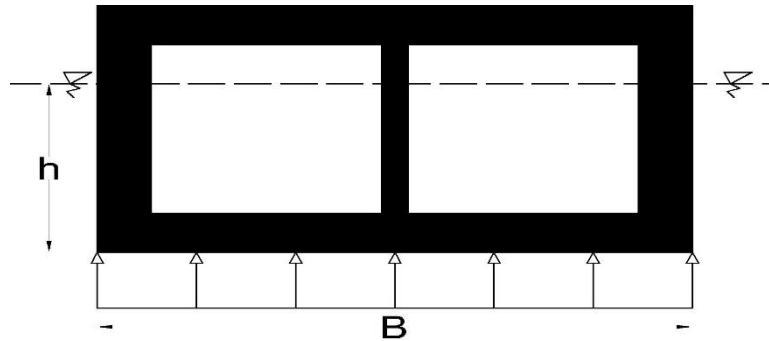
Dimana :

- W_e = Gaya Akibat Gempa (ton)
- W = Berat Sendiri Bangunan (ton)
- K_h = Koefisien Gempa

(Sumber : Braja M. Das, Jilid 2:83).

4. Tekanan air ke atas (*Uplift*)

Gaya tekan ke atas (*Uplift*) yang bekerja pada lantai bangunan adalah sama dengan berat volume air yang dipindahkan oleh bangunan :



Gambar 2.5 Gaya Uplift

$$P_u = B \cdot h \cdot \gamma_w \dots\dots\dots (2-21)$$

Dimana :

P_u = Gaya tekan air ke atas (t)

B = Lebar saluran (m)

h = Tinggi muka air (m)

γ_w = Berat Jenis Air (t/m^2)

(Sumber : *Kriteria Perencanaan 06, 2009:67*).

2.4.4 Tulangan

Ringkasan langkah-langkah pelat satu arah adalah sebagai berikut :

1. Hitung h minimum pelat

$$\frac{L}{20} \left(0,4 + \frac{F_y}{700} \right) \dots\dots\dots (2-22)$$

Dimana :

L = Bentang Pelat (m)

F_y = Mutu Baja (Mpa)

2. Hitunglah beban mati berat sendiri pelat dan kemudian hitunglah beban rencana total (W_u)

3. Hitung momen rencana (M_u)

4. Hitung Tebal efektif pelat (d)

$$d = h - \text{selimut beton} - 2.(0,5 \times D) \dots\dots\dots (2-23)$$

Dimana :

d = Tinggi Efektif Pelat (mm)

h = Tebal Pelat (mm)

D = Diameter Tulangan (mm)

5. Hitung k perlu

$$k = \frac{Mu}{\phi b.d} \dots\dots\dots (2-24)$$

Dimana :

k = Koefisien

Mu = Momen (KN.m)

b = lebar (tiap 1 m)

d = tebal pelat (m)

Dengan mengetahui nilai k maka dapat di dapatkan nilai rasio penulangan (ρ) dengan bantuan tabel yang tersedia.

6. Tentukan rasio penulangan (ρ) dari tabel A-6 sampai dengan A-37 dengan syarat $\rho < \rho_{maks}$. Tabel A-6 sampai dengan A-37 dapat dilihat pada bagian lampiran Buku Beton Bertulang.

7. Hitung As yang diperlukan

$$As = \rho . b . d \dots\dots\dots (2-25)$$

Dengan didaptkannya luas (A_s) yang diperlukan maka dapat diketahui diameter serta jarak antar tulangan dengan bantuan tabel.

8. Pilih tulangan pokok dengan menggunakan tabel A-4.

Tabel A-4 dapat dilihat pada bagian lampiran Buku Beton Bertulang.

9. Hitung tulangan susut dengan syarat :

- a. $A_s = 0,0020.b.h$ untuk baja mutu 30
- b. $A_s = 0,0018.b.h$ untuk baja mutu 40
- c. $A_s = 0,0018.b.h$ untuk mutu baja lebih tinggi dari 40

10. Jumlah luas penampang tulangan baja pokok tidak boleh lebih kurang dari jumlah luas penulangan susut.

(Sumber : Istimawan Dipohusodo, 1994:61).

2.5 Biaya Konstruksi

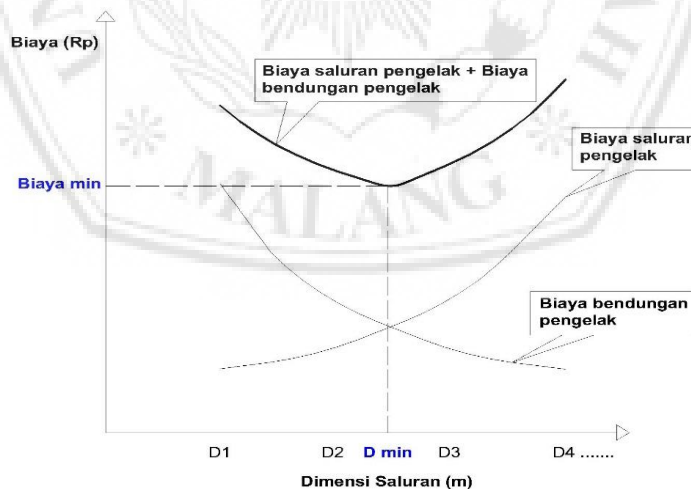
Dalam merencanakan suatu konstruksi bangunan, perhitungan biaya merupakan komponen penting dalam perhitungan konstruksi tersebut. Begitupun dalam studi ini, optimasi saluran pengelak dan bendungan pengelak juga ditinjau dari segi biaya konstruksinya.

2.6 Teknik Optimasi

Dalam studi ini, pembahasan teknik optimasi mengacu pada buku yang berjudul Pembangkit Listrik Tenaga Air karya M.M. Dandekar dengan metode penyelesaian secara grafik. Teknik optimasi tersebut membandingkan diameter pipa dengan biaya tahunan batang-batang pipa yang semakin tahun semakin mahal dan biaya energi yang susut dalam geseran pada angka yang umum dari penjualan semakin tahun karena hp susut. Kemudian di dalam sistem pengelak, apabila bendungan pengelak dipertinggi, berarti tinggi tekanan pada saluran pengelak akan meningkat pula, sehingga ukuran

saluran pengelak menjadi kecil. Karena mempunyai kesamaan optimasi dimensi sistem pengelak secara praktis dapat dilakukan dengan mengikuti langkah-langkah berikut ini :

1. Tentukan dimensi saluran tertentu (D_1)
2. Lakukan penelusuran banjir (routing) pada waduk melalui saluran tersebut
3. Menghitung tinggi bendungan pengelak yang diperlukan sesuai dimensi saluran tersebut
4. Perkirakan biaya total konstruksi saluran dan tubuh bendungan pengelak
5. Plot hasil perhitungan tersebut pada grafik hubungan antara dimensi pegelak dan biaya konstruksi
6. Ulangi langkah pertama dengan masukan dimensi saluran pengelak yang lain (D_2)
7. Hentikan perhitungan bila data sudah dianggap cukup
8. Tentukan dimensi pengelak optimum yang diperoleh dari grafik dan merupakan fungsi biaya konstruksi total



Gambar 2.6 Grafik Hubungan Antara Dimensi Pengelak dan Biaya Konstruksi

Untuk optimasi dimensi sistem pengelak dalam studi ini, variable bebas yang dipakai yaitu ukuran dimensi saluran pengelak (hanya satu variable bebas), sedangkan untuk batasan atau *constraint* pada studi ini adalah :

Saluran pengelak berbentuk *Box Conduit*, jumlah pada saluran pengelak adalah 2 buah, dan rentan dimensi saluran mulai dari 1 – 4 m.

Dalam studi ini mencari dimensi saluran yang optimal dengan mempertimbangkan biaya konstruksi saluran dan bendungan pengelak. Sehingga untuk studi ini mengambil bentuk minimasi, agar mencapai parameter yaitu biaya termurah.

